

Computers subacquei, software ed algoritmi decompressivi nella didattica subacquea italiana

La grande partecipazione di subacquei ai congressi di Medicina Iperbarica testimonia l'interesse crescente per l'approfondimento delle conoscenze sulle teorie del calcolo della decompressione ma spesso, dopo le dotte relazioni di fisiologi e tecnici, i dubbi e la confusione non diminuiscono.

Nel campo degli studi iperbarici esiste una certa confusione, dovuta al fatto che fisiologi e tecnici usano la loro terminologia, i programmatori di computers usano il loro gergo tecnico e spesso la situazione viene peggiorata da difficili traduzioni da testi stranieri, ma i subacquei vogliono capire come il particolare computer che portano al polso riesce a calcolare le modalità di risalita migliori per la loro sicurezza; vogliono "misurare" e "classificare" la loro sicurezza.

La diffusione dei computers anche fra i subacquei alle prime armi rende oramai impensabile fare didattica o anche solo parlare di tecniche di risalita ignorando che lo strumento principale di calcolo della decompressione è il computer subacqueo, ed anche i software decompressivi cominciano a diffondersi.

La F.I.P.S.A.S., Federazione Italiana Pesca Sportiva ed Attività Subacquee, ha sempre promosso e ricercato progetti e soluzioni finalizzate a migliorare la conoscenza e la sicurezza di chi si immerge ed ha ritenuto che è sicuramente opportuno che gli istruttori subacquei comincino ad esplorare la didattica del calcolo decompressivo e lo studio dei profili decompressivi.

Quindi occorre cominciare fornire definizioni univoche dei termini tecnici usati in questo campo per rendere comprensibili a tutti i contenuti delle relazioni sulla teoria del calcolo della decompressione che troviamo sempre più spesso sui giornali di settore e tramite internet.

A questo scopo è stato realizzato il nuovo manuale didattico "Decompressione al computer" – "Analisi teorico-pratica del fenomeno decompressivo e dei software che lo controllano" pubblicato dalla F.I.P.S.A.S. e dall' Editoriale Olimpia di Firenze e scritto da Mario Giuseppe Leonardi.

Allegato al manuale viene distribuito un CD-ROM contenente "Immersioni", il primo software italiano per la simulazione dell'immersione, realizzato esclusivamente a scopo didattico dallo stesso autore, che viene costantemente aggiornato tramite l'apposito sito internet: www.lmgsoft.com con la collaborazione degli istruttori e dei subacquei che utilizzano il programma stesso, e che contiene una guida in linea interattiva con tutte le definizioni dei termini tecnici relativi alla teoria del calcolo computerizzato della decompressione.

Libro e CD-ROM possono essere acquistati direttamente presso le migliori librerie, oppure ordinati telefonicamente tramite il numero verde del Gruppo Editoriale Olimpia di Firenze 800 -018356, oppure ordinati via internet tramite i siti www.edolimpia.it, www.daneurope.org, www.lmgsoft.com.

I Commissari Federali d'Esame per Istruttori che parteciperanno alle Sessioni Ufficiali di Aggiornamento F.I.P.S.A.S. 2003 troveranno nel CD-ROM che verrà loro distribuito, all'interno della cartella "Installazione di Immersioni", il file "setup.exe" che contiene il programma d'installazione automatica dell'ultima versione del software "Immersioni" e potranno quindi installarlo nei loro computers con l'assistenza diretta dell'autore.

Come utilizzare in ambito didattico il manuale ed il programma “Immersioni”

Scopo del manuale “Decompressione al computer” è di aggiungere alla consolidata metodologia di insegnamento teorico utilizzata dalla F.I.P.S.A.S. le nuove cognizioni che riguardano il calcolo della decompressione tramite computers e software decompressivi.

Partendo da una trattazione per quanto possibile discorsiva ed esemplificativa e quindi facilmente fruibile anche da allievi dei corsi di avviamento alla subacquea, il manuale introduce però contemporaneamente anche le formule e le relative rigorose dimostrazioni matematiche.

In effetti scopo dichiarato del manuale è di giungere a fornire il “diagramma di flusso” (flow -chart) di tutte le formule necessarie al funzionamento di un computer subacqueo onde permettere a chi ha conoscenza di un qualsiasi linguaggio di programmazione software di cimentarsi nella realizzazione di un rudimentale “simulatore d’immersione”.

Sia però ben chiaro che, nel normale uso in ambito didattico subacqueo, l’approfondimento delle formule matematiche e delle relative dimostrazioni, pur indicate nel manuale per essere utilizzate da eventuali aspiranti programmatori di software decompressivi, è assolutamente da evitare o, a discrezione dell’istruttore, da limitare rigidamente in considerazione del livello di conoscenze già acquisite dagli allievi.

Il programma software “Immersioni” permette invece di mostrare durante una lezione ad allievi di qualsiasi livello culturale, in forma grafica e numerica, in tempo reale durante un’immersione simulata o analizzando il profilo di una immersione effettivamente già effettuata, tutti i parametri numerici calcolabili con un computer, l’andamento delle tensioni nei compartimenti, l’avvicinarsi ai valori critici delle tensioni e della curva di sicurezza, quali sono i compartimenti che pilotano la decompressione ecc.

L’uso didattico più proficuo del programma si ottiene utilizzandolo in fase di briefing per memorizzare e stampare il profilo dell’immersione che ci si appresta ad effettuare secondo la programmazione preventivata (**programmazione da effettuare esclusivamente seguendo le metodologie classiche conosciute ed utilizzando tabelle di decompressione stampate nelle versioni ufficialmente fornite dagli Istituti di Ricerca Iperbarica che le hanno realizzate**) e utilizzandolo poi in fase di debriefing per verificare di quanto il profilo realmente seguito si discosta da quello preventivato e per analizzare con gli allievi istante per istante tutto l’andamento dell’immersione appena effettuata.

Le stampe dei profili realizzati possono essere anche utilizzate per memorizzare i momenti in cui si sono incontrati particolari esemplari di fauna o flora sottomarina, o qualunque evento rilevante avvenuto durante l’immersione, come ad esempio una situazione di affanno o un risalita eccessivamente veloce.

Condizione indispensabile per poter realizzare tutto ciò è ovviamente disporre a terra, vicino al luogo d’immersione, di un computer e possibilmente anche di una stampante.

Qui di seguito riassumo le nozioni fondamentali necessarie per capire come un programma software può cercare di calcolare il tipo di decompressione che dovremo effettuare.

Da cosa è composto un metodo (o algoritmo) decompressivo

- 1- Da alcune formule matematiche che consentono di calcolare dei valori numerici che esprimono la quantità di gas inerte (tensione) presente in una serie di compartimenti.
- 2- Da alcune condizioni matematiche che consentono di verificare se i valori delle tensioni sono inferiori a quelli critici massimi sperimentalmente verificati e ritenuti sicuri.
- 3- Da una serie di correzioni empiriche che permettano di “aggiustare” il nudo risultato matematico così ottenuto rendendolo compatibile alle evidenze sperimentali.

Come classificare un metodo decompressivo o “compartimentale”?

- 1- Individuando che tipo di formule sono state usate per calcolare le tensioni nei compartimenti.
- 2- Indicando come i compartimenti interagiscono fra loro: in parallelo, in serie -parallelo o in serie.
- 3- Individuando quanti e quali compartimenti sono stati usati, indicando cioè il loro tempo di emiasaturazione.
- 4- Indicando che tipo di criterio di sicurezza è stato applicato ai valori delle tensioni durante la risalita.
- 5- Indicando quale curva di sicurezza sperimentale si intende o tenere come obiettivo.

Quante e quali sono le formule utilizzate per il calcolo delle tensioni nei compartimenti?

“La velocità con cui varia la tensione di gas inerte in un compartimento è proporzionale alla differenza istantanea fra la pressione parziale del gas inerte nella miscela respirata e la tensione di gas inerte nel compartimento.”

Questa affermazione, sulla cui veridicità si basa tutta la teoria del calcolo numerico della decompressione, si può scrivere con una formula matematica

$$dT_i/dt = K_i (P_p - T_i)$$

ove

T_i è la tensione di gas inerte nel compartimento numero i

t è il tempo

K_i è un coefficiente numerico caratterizzante il compartimento numero i

P_p è la pressione parziale del gas inerte respirato

Da questa formula fondamentale, con opportuni passaggi matematici, si ricava la **formula di Haldane** che può essere scritta in due modi diversi ma perfettamente equivalenti:

$$T_i(t_f) = Pp - (Pp - T_i(t_i))e^{-K_i(t_f - t_i)}$$

oppure

$$T_i(t_f) = T_i(t_i) + (Pp - T_i(t_i))(1 - e^{-K_i(t_f - t_i)})$$

ove

$$K_i = \lg_e 2 / \text{tempo}_{\text{emisaturaz}_i}$$

cioè

$$K_i = 0,693... / \text{tempo}_{\text{emisaturaz}_i}$$

La formula di Haldane è applicabile solo se la pressione parziale del gas inerte respirato Pp si mantiene costante in tutto l'intervallo di tempo ($t_f - t_i$), cosa che avviene solo per immersioni effettuate a profondità costante.

Quindi questa formula è stata utilizzata per calcolare le tabelle di decompressione ma **non può essere utilizzata nei computers che analizzano immersioni multilivello**; in effetti nei computers da immersione la formula di Haldane viene utilizzata solo per calcolare il tempo di non decompressione (no deco time).

Sempre dalla formula fondamentale sopra indicata può essere ricavata anche la **formula di Schreiner**:

$$T_i(t_f) = Pp(t_i) + DP \left((t_f - t_i) - \frac{1}{K_i} \right) - \left(Pp(t_i) - T_i(t_i) - \frac{DP}{K_i} \right) e^{-K_i(t_f - t_i)}$$

ove

$$DP = \frac{Pp(t_f) - Pp(t_i)}{t_f - t_i}$$

La formula di Schreiner invece è applicabile solo se la pressione parziale del gas inerte respirato Pp varia con velocità costante in tutto l'intervallo di tempo ($t_f - t_i$), cosa che avviene solo durante ipotetici tratti di discesa o di risalita effettuati a velocità costante; quindi è utilizzata nei software decompressivi in quanto questi descrivono un'immersione proprio come una discesa a velocità costante seguita da una permanenza a quota costante seguita da una serie di tratti di risalita effettuati ciascuno a velocità costante e sempre più bassa avvicinandosi alla superficie.

La formula di Schreiner, nel caso particolare di velocità di variazione di quota nulla ($DP = 0$), con semplici passaggi matematici, si trasforma nell'equazione di Haldane che quindi ne costituisce un caso particolare.

Quale formula si usa davvero nei computers subacquei?

Il computer da immersione segue il subacqueo in un'immersione reale che non avviene né a profondità costante né tantomeno a velocità di variazione di quota costante; il problema si supera considerando l'immersione come un insieme di successivi intervalli brevissimi, lunghi pochi secondi, detti “**intervallo di rilevazione**” durante i quali l'immersione possa essere considerata, con buona approssimazione, come se fosse effettuata a quota costante o a velocità di variazione di quota costante.

All'interno del singolo intervallo di rilevazione è possibile usare la formula di Schreiner che, nel caso particolare di velocità di variazione di quota nulla, automaticamente si trasforma nella formula di Haldane.

Una formula che velocizza il calcolo nel singolo intervallo di rilevazione in quanto non richiede di effettuare il calcolo dell'esponenziale ($e^{-K_i(t_f-t_i)}$) è infine la **formula degli Intervalli Finiti** che è ancora più facile da applicare:

$$T_i(t_f) = \frac{K_i(t_f - t_i)}{K_i(t_f - t_i) + 2} (Pp(t_f) - Pp(t_i)) - \frac{K_i(t_f - t_i) - 2}{K_i(t_f - t_i) + 2} T_i(t_i)$$

Questa è una formula approssimata e si discosta tanto più dall'indicazione esatta quanto maggiore è la durata dell'intervallo di rilevazione, è quindi importante che i computers che la utilizzano adottino intervalli di rilevazione molto brevi.

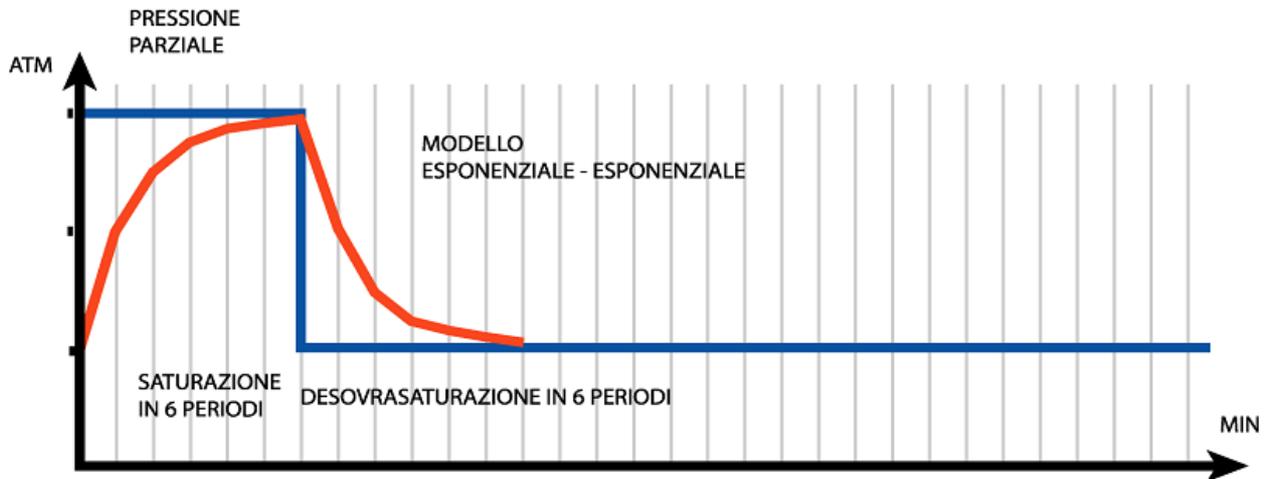
L'errore aumenta nel tempo

L'elaborare valori numerici relativi ad un intervallo successivo partendo da valori numerici calcolati nell'intervallo precedente comporta ovviamente un incremento dell'errore numerico in sito nel metodo di calcolo che aumenta man mano che si procede nell'immersione, soprattutto nelle immersioni successive e quando il computer resta acceso diversi giorni per registrare più immersioni (multi-day).

Sono tutte formule derivate da quella di Haldane

Tutte le formule elencate sono solo formalmente diverse ma in effetti sono tutte ricavate della stessa formula iniziale; i risultati matematici forniti da queste formule sono assolutamente uguali ed esse forniscono quindi per le tensioni un andamento esponenziale sia in saturazione che in desovrasaturazione, quindi perfettamente simmetrico, e che per questo viene definito esponenziale - esponenziale.

Il modello Esponenziale -Esponenziale



Il modello Esponenziale-Lineare

L'unico tentativo di fornire con formule matematiche un andamento delle tensioni non simmetrico è quello del Dottor Thalmann che in effetti sostituisce parte della sola desovrasaturazione con una retta. Variando opportunamente l'inclinazione della retta si può portare la desovrasaturazione a durare anche 24 o più periodi contro i 6 previsti dal metodo esponenziale -esponenziale classico ma questo modello fu inizialmente ritenuto troppo conservativo e non fu applicato immediatamente.

Quali sono le modalità di interazione fra i compartimenti?

Compartimenti “tutti in parallelo”

Tutti i compartimenti vengono considerati “in parallelo” fra loro come se fossero tutti in diretto contatto con la miscela respirata senza nessun collegamento l'uno con l'altro.

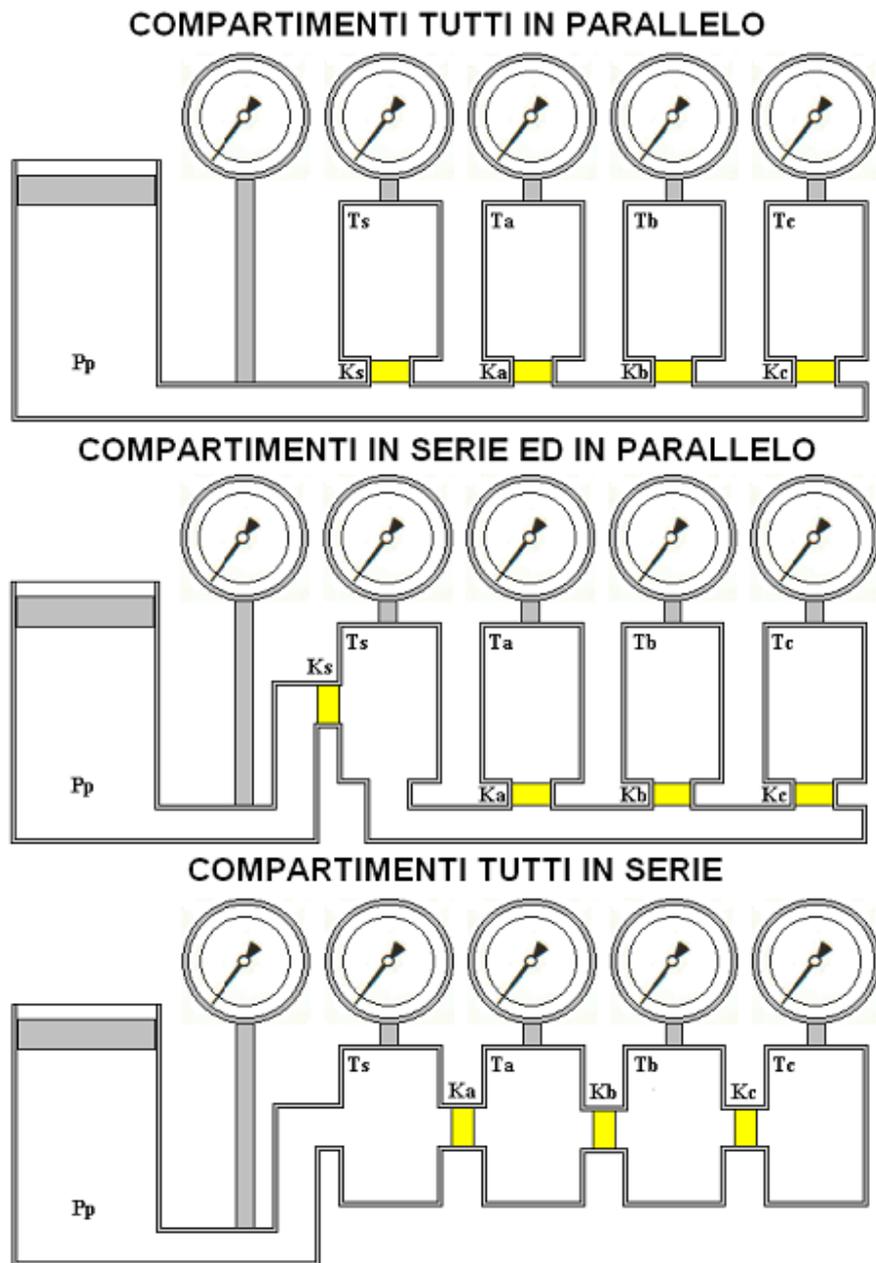
Primo compartimento “in serie” con gli altri “in parallelo” fra loro

La miscela respirata viene considerata direttamente in contatto solo col primo compartimento e questo, a sua volta ha collegati direttamente “in serie” con lui ma “in parallelo” fra loro tutti gli altri compartimenti.

Compartimenti “tutti in serie”

La miscela respirata viene considerata direttamente in contatto solo col primo compartimento, questo a sua volta viene considerato collegato direttamente “in serie” solo col secondo compartimento, il secondo viene considerato collegato direttamente “in serie” solo col terzo e così via per tutti gli altri compartimenti.

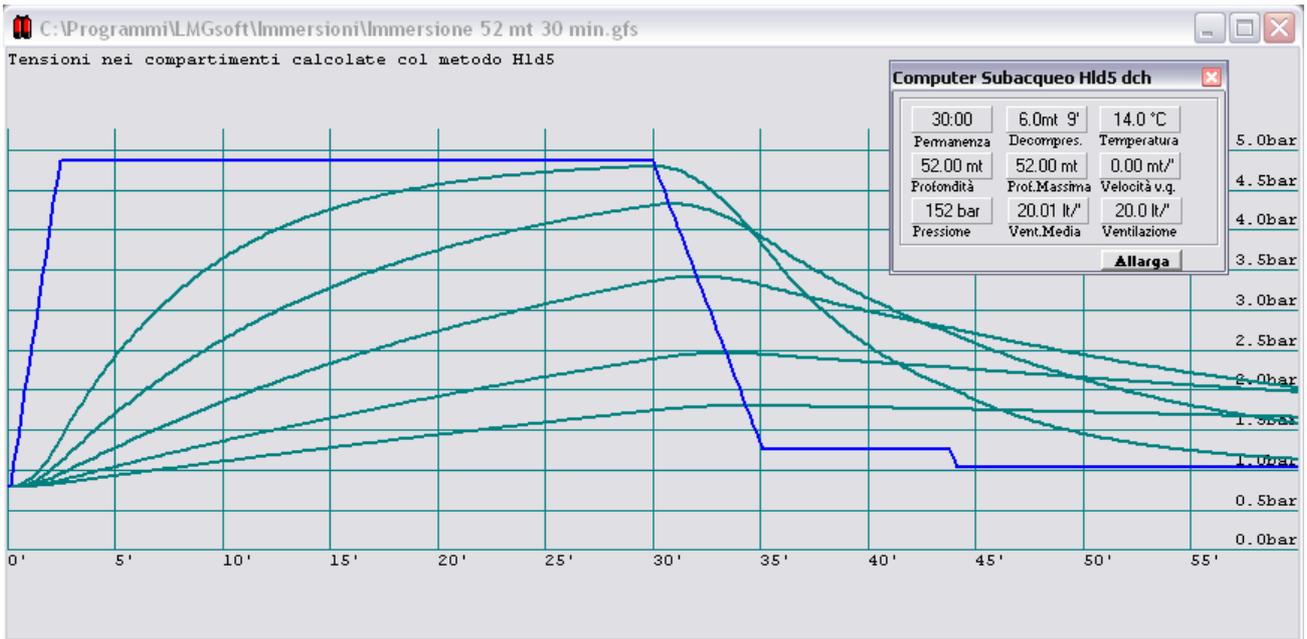
La seguente schematizzazione grafica applicata un esempio meccanico può chiarire queste definizioni.



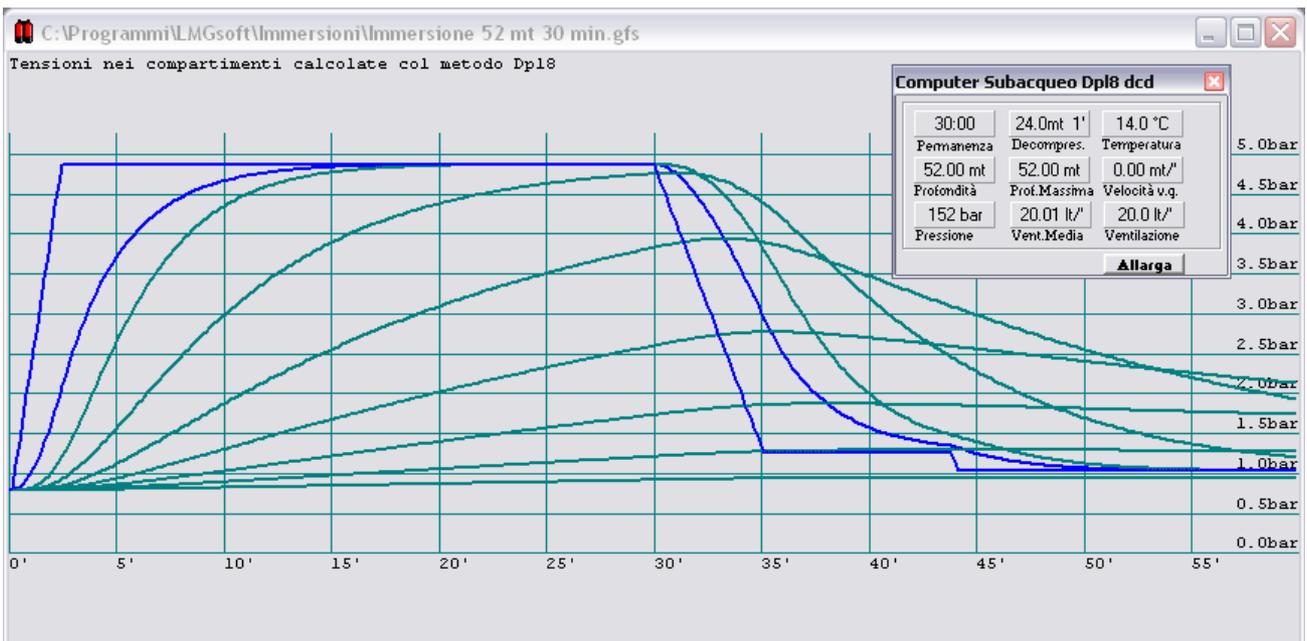
Nei modelli decompressivi che considerano i c ompartimenti tutti in parallelo fra loro, durante la risalita che segue la fase di fondo di un'immersione, i compartimenti cominciano a desovrasaturarsi non appena la pressione parziale della miscela respirata diventa inferiore al valore della tensione cal colata nel singolo compartimento.

Ciò significa in pratica che tutti i compartimenti cominciano a desovrasaturarsi già dai primi momenti della risalita e continuano a farlo sia durante tutte le soste di decompressione che in superficie.

Modello decompressivo con 5 compartimenti tutti in parallelo fra loro



Modello decompressivo con un compartimento in serie con altri sette in parallelo fra loro



Nei modelli decompressivi che considerano i compartimenti non tutti in parallelo fra loro ogni singolo compartimento comincia a desovrasaturarsi solo quando la tensione in esso calcolata diventa inferiore a quella nel compartimento collegato in serie prima di lui e ciò comporta che alcuni compartimenti possono continuare a saturarsi anche durante tutta la risalita ed anche una volta raggiunta la superficie. Questi modelli allungano notevolmente la durata della fase di desovrasaturazione e richiedono soste di decompressione più profonde e più lunghe ovviamente anche nelle immersioni successive.

I tempi di emisaturazione dei compartimenti

Il “tempo di emisaturazione” o “periodo” o “emitempo” è il tempo necessario affinché un compartimento riesca ad assorbire la metà della ulteriore quantità di gas inerte che può assorbire rimanendo sottoposto ad una data pressione parziale costante.

Il “tempo di emisaturazione” viene usato come parametro caratterizzante la velocità di saturazione e desovrasaturazione di un compartimento; ricordiamo infatti che

$$K_i = 0,693... / \text{tempo}_{emisaturaz_i}$$

L'importanza del tempo di emisaturazione dal punto di vista del calcolo numerico è evidente in quanto permette di determinare per ogni compartimento il valore del coefficiente numerico K_i che compare in tutte le formule sopra indicate.

Quanti e quali sono gli insiemi di compartimenti utilizzati dai vari ricercatori?

1908 Metodo di Haldane - I compartimenti sono 5 con periodo: 5 10 20 40 75 minuti.

1937 Studi US Navy - I compartimenti sono 3 con periodo: 20 40 75 minuti.

1951 Studi US Navy - I compartimenti sono 6 con periodo: 5 10 20 40 75 120 minuti.

1957 Studi US Navy - I compartimenti sono 6 con periodo: 5 10 20 40 80 120 minuti.

1965 Studi US Navy - I compartimenti sono 9 con periodo: 5 10 20 40 75 120 160 200 240 minuti.

1976 Tabelle PADUA - I compartimenti sono 10 con periodo: 5 10 20 40 80 120 160 240 320 480 minuti.

1983 Tabelle Buhlmann - I compartimenti sono 16 con periodo: 2.65 7.94 12.2 18.5 26.5 37 53 79 114 146 185 238 304 397 503 635 minuti.

1989 Modello Hamilton DCAP - I compartimenti sono 11 con periodo: 5 10 25 55 95 145 200 285 385 520 e 670 minuti.

1990 Modello Buhlmann ZH-L16 - I compartimenti sono 16 con periodo: 4(5) 8 12.5 18.5 27 38.3 54.3 77 109 146 187 239 305 390 498 e 635 minuti.

1993 Modello Thalmann - I compartimenti sono 9 con periodo: 5 10 20 40 80 120 160 200 e 240 minuti

1995 Modello Buhlmann ZH-L8 ADT - I compartimenti sono 8 con periodo: 5 10 20 40 80 160 320 e 640 minuti.

2002 Software V-Planner I compartimenti sono 16 con periodo: 5 8 12.5 18.5 27 38.3 54.3 77 109 146 187 239 305 390 498 e 635 minuti.

Un esempio di grafico delle tensioni in un modello decompressivo a 5 compartimenti



Quando le tensioni diventano critiche?

Una volta calcolati i valori numerici delle tensioni in un certo numero di compartimenti con una delle formule prima indicate, diventa indispensabile stabilire precisi “criteri di sicurezza” per sapere quando il valore numerico di quelle tensioni supera quei valori limite da considerare critici, al di sopra dei quali è ragionevole attendersi il presentarsi di manifestazioni patologiche evidenti di M.D.D.

Quali sono i criteri di sicurezza applicati dai vari ricercatori?

I criteri di sicurezza rappresentano il punto di incontro fra le formule del calcolo numerico teorico e i risultati scientifici sperimentali: ci dicono quali sono i valori numerici delle tensioni che i singoli compartimenti non debbono mai superare durante la risalita in quanto, in immersioni reali, per valori superiori ad essi sono stati riscontrati incidenti embolici.

Il fondamentale concetto di tensione critica T_c

La tensione critica T_c è la tensione massima calcolata tramite una formula matematica in un compartimento, durante una sperimentazione reale, senza che si siano registrati incidenti embolici; se si conosce la pressione atmosferica a cui è stata effettuata la sperimentazione, è immediato dedurre da questa con facili passaggi matematici sia il valore del rapporto di sovrasaturazione critica che il valore del gradiente di sovrasaturazione critica che definiremo qui di seguito.

Le prime ricerche effettuate sui lavoratori dei cassoni subacquei, che raggiungevano la completa saturazione durante lunghissimi turni di lavoro e poi tornavano direttamente in superficie senza nessuna sosta di decompressione, dimostrarono che gli incidenti colpivano quei lavoratori che operavano oltre i 10 m di profondità, cioè oltre le 2 atm quindi la tensione critica fu individuata in 2 atm ($T_c = 2 \text{ atm}$).

Il criterio del rapporto di sovrasaturazione critica Rc

Haldane sostenne che “manifestazioni evidenti di embolia si hanno quando la pressione a cui un subacqueo ha raggiunto la completa saturazione di tutto il suo corpo è almeno 2 volte la pressione atmosferica” e quindi il criterio di sicurezza da rispettare per evitare incidenti embolici è **mantenere il valore numerico della tensione a completa saturazione sempre inferiore a 2 volte la pressione atmosferica** a livello del mare.

Definendo rapporto di sovrasaturazione critica Rc il rapporto fra la tensione critica e la pressione atmosferica.

$Rc = T_c / P_{atm} = 2$ quindi il criterio di sicurezza da rispettare è

$$T_{a \text{ completa saturazione}} < 2 \times P_{atm} = 2 \text{ atm}$$

Il criterio del gradiente di sovrasaturazione critica Gc

Altri ricercatori, sostennero invece che “manifestazioni evidenti di embolia si hanno quando la pressione a cui un subacqueo ha raggiunto la completa saturazione di tutto il suo corpo supera di 1 atm la pressione atmosferica” e quindi il criterio di sicurezza da seguire per evitare incidenti embolici è **mantenere il valore numerico della tensione a completa saturazione sempre inferiore a 1 atm oltre la pressione atmosferica** a livello del mare.

Definendo gradiente di sovrasaturazione critica Gc la differenza fra la tensione critica e la pressione atmosferica.

$Gc = T_c - P_{atm} = 1 \text{ atm}$ quindi il criterio di sicurezza da rispettare è

$$T_{a \text{ completa saturazione}} < 1 \text{ atm} + P_{atm} = 2 \text{ atm}$$

Il risultato numerico è esattamente lo stesso e in effetti applicare il criterio del rapporto di sovrasaturazione critica o il criterio del gradiente di sovrasaturazione critica alle prime osservazioni sui lavoratori dei cassoni effettuati ai tempi di Haldane era assolutamente indifferente.

E' importante osservare che quegli esperimenti si limitavano ad osservare oltre quali profondità ed oltre quali tempi di permanenza si verificavano incidenti in “subacquei” che comunque avrebbero effettuato poi una risalita diretta in superficie senza soste, cioè in “subacquei” che, come noi oggi diremmo, effettuavano **immersioni esclusivamente in curva di sicurezza**.

Era quindi necessario formulare un nuovo criterio di sicurezza che potesse essere applicato anche a tratti di risalita che prevedevano come punto di arrivo non la superficie ma quote intermedie, quelle appunto delle soste di decompressione, e che però, nel caso di risalita diretta in superficie, corrispondesse ai due precedenti criteri allora proposti.

Il criterio della retta dei valori M

Il Dottor Workman introdusse un nuovo criterio di sicurezza che non dava ragione né ai sostenitori del metodo del rapporto di sovrasaturazione critica né ai sostenitori del metodo del gradiente di sovrasaturazione critica, ma che comprendeva entrambi i metodi come caso particolare, sostenendo che “manifestazioni evidenti di embolia si hanno quando la tensione di gas inerte calcolata in un compartimento è superiore ad un valore massimo dedotto sperimentalmente per ogni compartimento detto valore M”.

Il criterio di sicurezza secondo Workman è dunque che

$T < M$ ove il valore M è diverso per ogni compartimento e non più unico per tutto il corpo.

Il valore M non è però una grandezza fissa ma varia al variare della pressione ambientale secondo una legge lineare (è insomma rappresentabile con una retta se tracciata in un grafico che riporta le tensioni lungo l'asse verticale e le pressioni ambientali lungo l'asse orizzontale, detto “Grafico delle Pressioni e delle Rette dei Valori M”) la cui formula è

$$M = M_0 + \Delta M (P_{amb} - P_{atm}) \text{ in cui } M_0 = T_c$$

Se la pressione ambientale P_{amb} è uguale a quella atmosferica P_{atm} torniamo ai due casi precedenti, difatti $M = T_c = 2 \text{ atm}$ e il criterio di sicurezza da rispettare è come sempre

$$T < 2 \text{ atm} + \Delta M (P_{amb} - P_{atm}) = 2 \text{ atm}$$

Cerchiamo di capire meglio con un esempio

Consideriamo un'immersione a 40 mt di profondità (corrispondenti a 5 atm di pressione ambientale) protratta fino a raggiungere la completa saturazione (è evidentemente un esempio solo teorico).

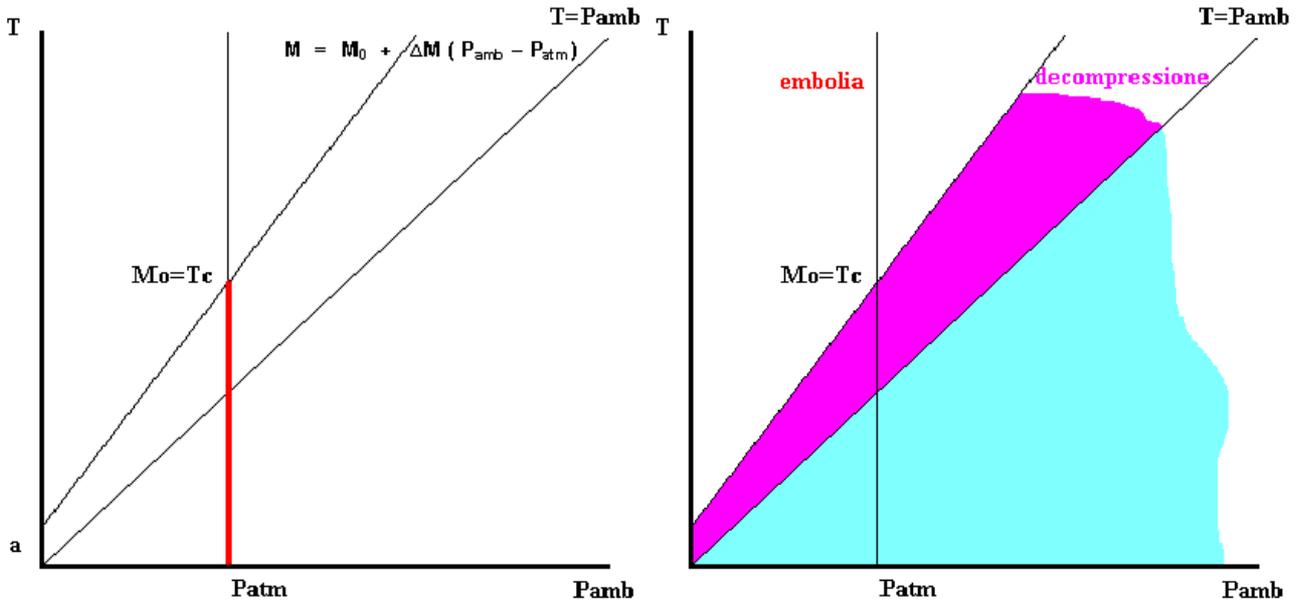
Se si applica come criterio di sicurezza il criterio del rapporto di sovrasaturazione critica di Haldane sarà necessario effettuare la prima sosta di decompressione alla profondità di **15 mt** (corrispondenti a 2,5 atm di pressione ambientale cioè la metà di quella di partenza).

Se si applica come criterio di sicurezza il criterio del gradiente di sovrasaturazione critica sarà necessario effettuare la prima sosta di decompressione alla profondità di **30 mt** (corrispondenti a 4 atm cioè una meno di quella di partenza).

Se si applica come criterio di sicurezza il criterio della retta dei valori M sarà possibile effettuare la prima sosta di decompressione ad una quota intermedia **fra i 15 ed i 30 mt** a seconda della particolare retta dei valori M presa in considerazione.

A titolo di cronaca ricordo che tutte le metodologie di adattamento delle Tabelle di Decompressione della Marina Militare Americana alle immersioni effettuate in quota sono basate sull'applicazione del criterio del rapporto di sovrasaturazione critica.

Il grafico delle pressioni e delle rette dei valori M



La retta più in alto è la “retta dei valori M” e la retta intermedia più bassa viene definita “retta della saturazione totale”.

Tutti i valori delle tensioni che si trovano nella zona azzurra al di sotto di tale retta (in cui le tensioni sono più basse della pressione ambientale) non richiederanno decompressione in quanto i relativi compartimenti si stanno ancora saturando.

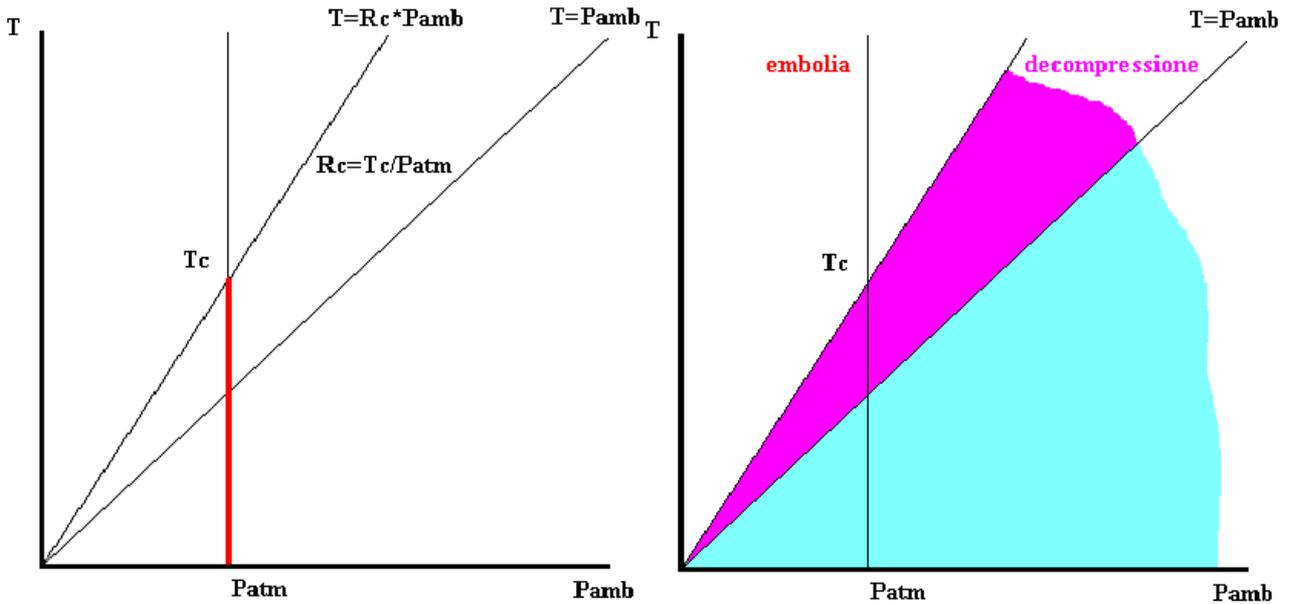
Tutti i valori delle tensioni che si trovano nella zona viola (in cui le tensioni si trovano al disotto della retta dei valori M) soddisfano il criterio della retta dei valori M e non genereranno incidenti embolici ma richiederanno una sosta di decompressione se si trovano al di sopra della retta dalla saturazione totale e sarà allora necessario controllare la velocità di risalita in modo che non si verifichino incidenti.

Il Dottor Buhlmann propose per la formula della retta dei valori M una forma diversa

$$M = a + (1 / b) P_{amb}$$

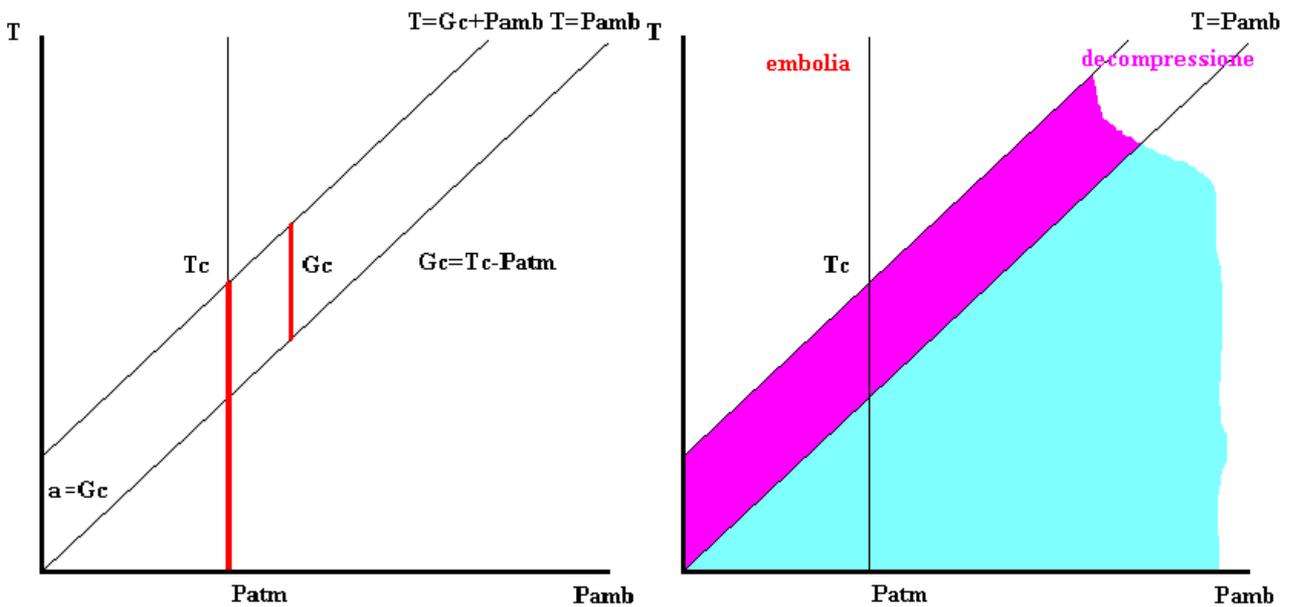
ma la differenza è solo formale quindi la stessa retta di valori M può essere espressa con la formula di Workman o di Buhlmann indifferentemente.

Caso del rapporto di sovrasaturazione critica R_c



Aumentando la profondità e quindi la pressione ambientale P_{amb} la retta dei valori M si allontana dalla retta della sovrasaturazione totale.

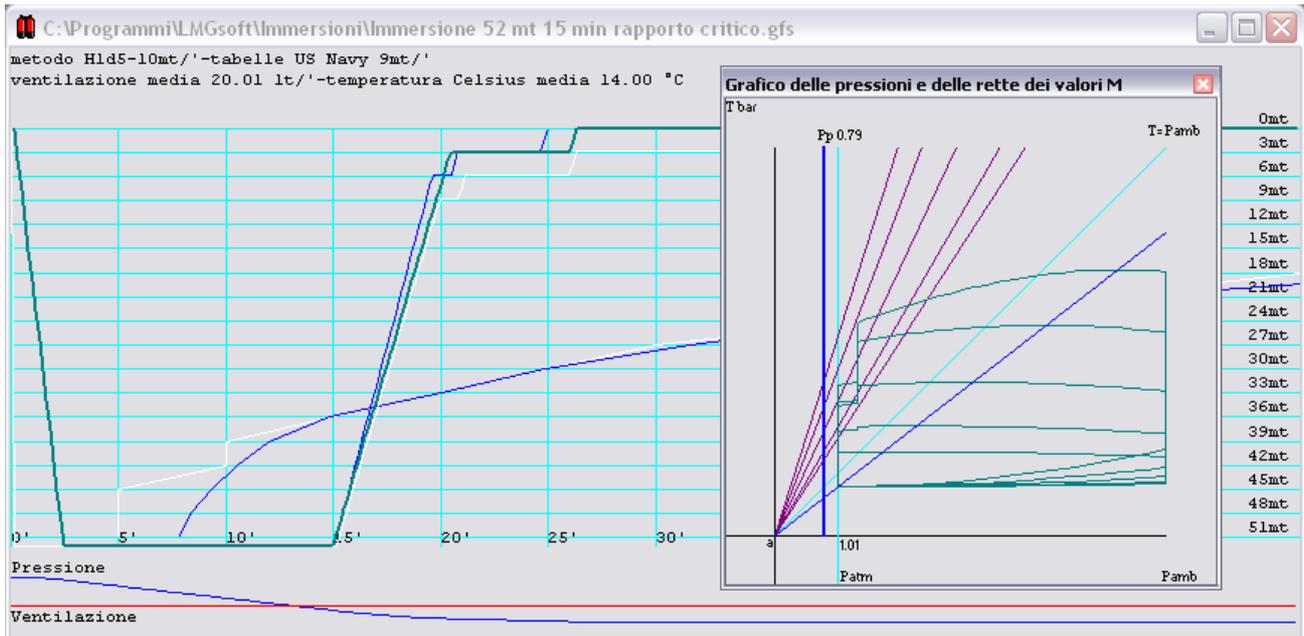
Caso del gradiente di sovrasaturazione critica G_c



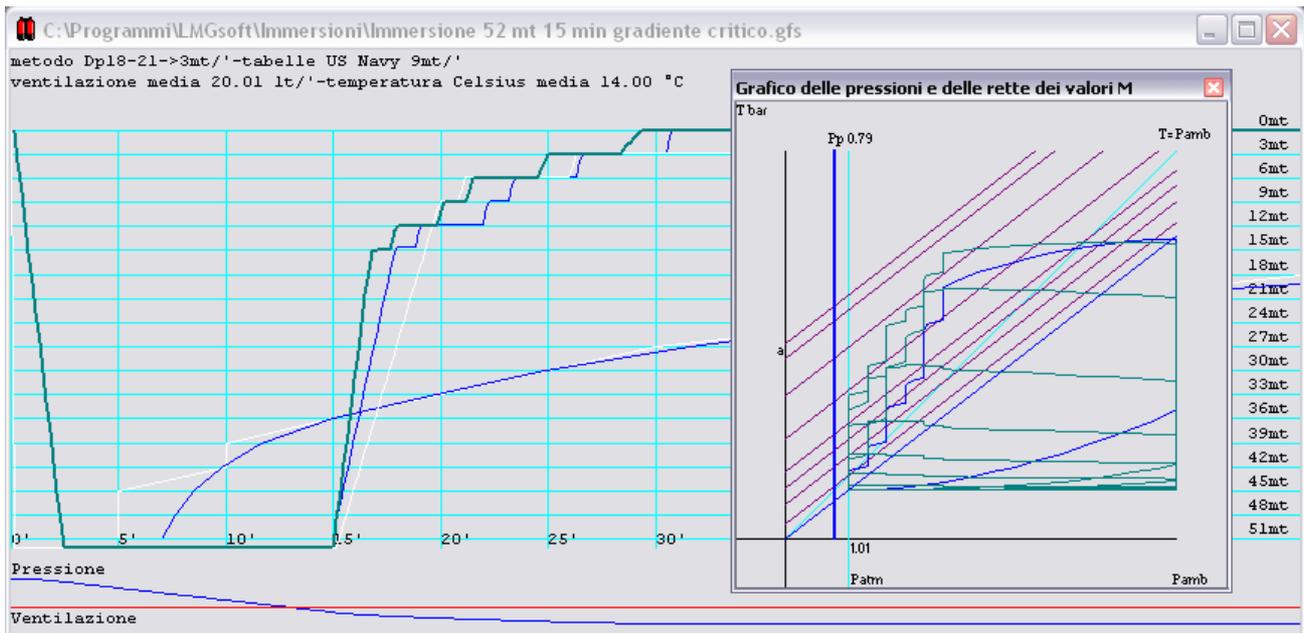
Aumentando la profondità e quindi la pressione ambientale P_{amb} , la retta dei valori M si mantiene parallela alla retta della saturazione totale ed il valore del gradiente di sovrasaturazione critica si mantiene costante.

Più le rette dei valori M si avvicinano a questa condizione di parallelismo con la retta della saturazione totale e più profonde saranno le prime soste richieste per la decompressione.

Modello decompressivo che applica il criterio del rapporto di sovrasaturazione critica



Modello decompressivo che applica il criterio del gradiente di sovrasaturazione critica



Ma computers subacquei che usano le stesse formule per il calcolo delle tensioni ed applicano lo stesso criterio di sicurezza indicano poi la stessa decompressione?

Al risultato matematico ottenuto con l'applicazione delle formule per il calcolo delle tensioni e con la verifica delle condizioni imposte dai criteri di sicurezza ogni computer subacqueo applica degli ulteriori criteri cautelativi per cercare di avvicinare il più possibile il nudo risultato matematico fornito dal calcolo ai risultati sperimentali.

Esempi di possibili criteri cautelativi sono: usare frazioni percentuali di gas inerte superiori al reale, moltiplicare i valori delle tensioni per dei coefficienti di sicurezza che aumentano con la profondità, aumentare i valori dei tempi di emisaturazione dei compartimenti solo durante la desovrasaturazione, diminuire il valore numerico dei valori M.

I parametri numerici fondamentali che entrano in gioco, e cioè i tempi di emisaturazione e le rette di valori M, possono essere resi “**adattanti**”, cioè modificabili in funzione di precisi parametri, la cui influenza nel fenomeno decompressivo sia sperimentalmente dimostrata, quali la **temperatura ambientale**, il **consumo ventilatorio**, la **formazione di microbolle**, la **durata dell'intervallo di superficie** nelle immersioni successive, la **differenza fra la quota massima raggiunta nella immersione precedente e in quella successiva** ecc.

Percentuale del valore M

Nei software per il calcolo della decompressione si evita accuratamente che in un qualsiasi momento della risalita i valori delle tensioni vadano ad eguagliare esattamente i valori numerici dei valori M ma si adottano dei “valori M di sicurezza” che non sono che una percentuale del valore M totale quindi il criterio di sicurezza adottato dal software non sarà ad esempio che la tensione si mantenga inferiore al valore M ma che si mantenga inferiore all'80% del valore M oppure al 75% del valore M e così via.

Considerazioni finali

Le formule effettivamente utilizzate nei computers subacquei e nei software decompressivi per calcolare le tensioni nei compartimenti sono tutte riconducibili ad una sola formula fondamentale con la sola eccezione (nella sola fase di desovrasaturazione) di quella del Dottor Thalman.

I compartimenti sono normalmente considerati tutti in parallelo fra di loro.

I possibili criteri di sicurezza sono tre ma riconducibili ad un unico metodo, quello delle rette dei valori M (Workman o Buhlmann).

Le correzioni sperimentali sono applicate principalmente e utilizzando il metodo della diminuzione percentuale del valore M.

I vari metodi decompressivi in definitiva si differenziano l'uno dall'altro, limitatamente al solo ambito del calcolo numerico, per il numero ed il tipo di compartimenti considerati, per la particolare retta dei valori M applicata ad ogni singolo compartimento e per il tipo di correzioni sperimentali applicate ad ogni singolo compartimento.

Per gli approfondimenti agli argomenti qui sopra accennati si rimanda alla lettura del manuale “Decompressione al computer” e per l'analisi dei grafici delle pressioni e delle rette dei valori M relativi a profili di immersioni simulate o reali si rimanda all'uso del programma “Immersioni”.

Mario Giuseppe Leonardi, Commissario Federale d'Esame C.O.N.I. - F.I.P.S.A.S.